DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160786

马维玲, 石培礼, 宗宁, 赵广帅, 柴曦, 耿守保. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 478−489
Ma W L, Shi P L, Zong N, Zhao G S, Chai X, Geng S B. Water conservation capacity of forest ecosystems in Taihang Mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 478−489

太行山区主要森林生态系统水源涵养能力*

马维玲[1], 石培礼[1,2**], 宗 宁[1], 赵广帅[1,2], 柴 曦[1,2], 耿守保[1,2]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100190)

摘 要: 森林生态系统水源涵养功能是林冠层、枯落物层和土壤层对大气降水进行再分配的过程。本文通过文献收集整理太行山地区森林植被林冠一次降水截留量、枯落物层持水量和土壤层贮水量数据, 分析该地区主要森林植被对降水的截留和贮蓄能力, 采用综合蓄水能力法对森林植被的综合涵养水源能力进行评价, 旨在为合理经营和管理森林生态系统提供依据。结果表明: 1)土壤非毛管孔隙度与生态系统综合持水量呈正相关, 且最大持水量占整个森林生态系统综合持水量的 90%以上, 表明土壤层作为森林生态系统水文效应最重要的一层, 是整个森林系统水分循环的主要贮蓄库和调节器; 2)针叶林中油松和侧柏的冠层一次降水截留量显著高于其他林型, 其林冠结构更加适应该地区气象条件, 林冠层降水再分配能力也优于其他林型; 3)混交林郁闭度低, 有利于林下灌、草丛的生长, 其枯落物现存量比纯林和人工林更高, 虽然林冠一次截留量低但林下具有丰富的枯落物层而更易涵养水源; 4)天然林综合蓄水能力整体高于人工林, 侧柏人工林和油松人工林综合蓄水能力仅次于刺槐、侧柏和油松天然林。综上可见, 合理利用森林资源防止水土流失、天然林长期封育和合理控制优势树种密度及增加植被覆盖率对太行山地区植被恢复和生态建设具有重要意义。为提高该区综合水源涵养能力, 可增加乡土树种油松和侧柏人工林的种植面积。

关键词: 太行山区; 森林植被类型; 水源涵养; 综合蓄水能力
中图分类号: S715.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)04-0478-12

Water conservation capacity of forest ecosystems in Taihang Mountain*

MA Weiling[1], SHI Peili[1,2**], ZONG Ning[1], ZHAO Guangshuai[1,2], CHAI Xi[1,2], GENG Shoubao[1,2]

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Water conservation is a comprehensive water resources regulatory function of forest ecosystems through various hydrological processes, including canopy interception, litter containment and soil retention. As a typical northern rocky mountain area, Taihang Mountain is characterized by low rainfall with uneven seasonal distribution, shallow soil, low soil water-holding capacity and fragile environment. In spite of this, Taihang Mountain is an important ecological security shelter for the water sources belt in the North China Plain. Water has become one of the key limiting factors for the protection and restoration of vegetation in the region. Therefore, comparative analysis of water conservation capacities of main forest vegetation types is needed for development of

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB452705)资助
**通讯作者: 石培礼, 主要研究方向为植物生理生态学和生态系统生态学。E-mail: shipl@igsnrr.ac.cn
马维玲, 主要研究方向为生态系统生态学。E-mail: mawl.09b@foxmail.com
收稿日期: 2016-11-11 接受日期: 2017-01-20
* Supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB452705)
** Corresponding author, E-mail: shipl@igsnrr.ac.cn
Received Nov. 11, 2016; accepted Jan. 20, 2017

feasible measures for water conservation and sustainable water security in the region. In this paper, we selected 196 records of canopy interception, litter and soil water carrying capacity in the natural deciduous broad-leaved forest, artificial deciduous broad-leaved forest, mixed forest, natural coniferous forest, coniferous forest and shrubs in the mountain region. We integrated water storage capacity with canopy rainfall interception, litter and soil water-holding capacity and then analyze water carrying capacities of main forest vegetation types in the area. Forest integrated water conservation capacity was calculated using a water conservation function for forest ecosystems. The results showed that: 1) soil non-capillary porosity had positive correlation with integrated water holding capacity of the ecosystem and the maximum soil water-holding capacity accounted for over 90% of the total water capacity of forest ecosystems in the region. It was revealed that soil layer, as the main water reservoir, was the most important layer for hydrological processes in the forests. 2) Coniferous forests such as *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* were more suitable for regional meteorological conditions. Redistribution capacity of precipitation by coniferous forest is significantly higher than that of other forest types. 3) Low canopy density of mixed forest was beneficial to shrub growth and its litter holding was also higher than that of pure forest. 4) Although comprehensive water storage capacity of natural forest was higher than that of plantation forest, water storage capacity of *P. orientalis* plantation and *P. tabuliformis* plantation ranked inferior to that of natural forests of *Robinia psendoacacia*, *P. orientalis* and *P. tabuliformis*. In summary, it was important to take afforestation measures for soil erosion, long-term forest enclosure and appropriate stand density in order to fulfill the goals of ecosystem restoration and ecological reconstruction. In order to increase water conservation capacity, plantation forest with tree species such as *P. tabuliformis* and *P. orientalis* was recommended in afforestation. This study provided the basis for the evaluation of water conservation capacity of vegetation along with rational management of forest and water resources. It laid the foundation for environmental protection and disaster prevention and mitigation in Taihang Mountain.

Keywords: Taihang Mountain; Forest vegetation type; Water conservation; Comprehensive water retention capacity

森林和水的相互作用关系一直是林学、生态学关注的热点问题，而水源涵养能力则是森林生态系统的一项重要生态服务功能，是指生态系统在一定空间和时间范围内保持水分的过程和能力[1-4]。20 世纪末 21 世纪初，众多学者开始研究森林与水的相互关系。随着人口增长、水资源紧缺和水环境质量恶化，人们对森林水源涵养功能愈加重视，从不同区域、不同尺度对不同类型森林水源涵养功能的水文过程和形成机制进行了深入研究。如营建水源涵养林可以解决因水资源供需不协调导致的部分缺水问题[5]；长江上游[6]、祁连山[7]、大兴安岭[8]、黄土高原[9]、亚热带[10]、中国主要陆地[11]乃至全国[12]森林的水源涵养功能的研究对水土保持、水文调节、资源利用、生态安全屏障建设与保护，以及生态系统管理等有重要意义。影响森林水源涵养能力的因子很多，主要与气象、海拔、植被类型、地形、地表枯落物层、土壤等因素密切相关[3,7,13]，但主要受植被类型和土壤持水能力控制。鉴于其复杂性和动态性，水源涵养能力的核算方法也多种多样，主要包括林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法、土壤蓄水能力法、降水量储存法、水量平衡法等，每种方法都有其优点和局限性[6,14-19]。其中综合蓄水能力法是相对比较理想和最常用的综合评估方法，主要通过不同森林类型的冠层截留、枯落物层的吸水截持与土壤层非毛管孔隙持水等 3 个层次对降水进行有效拦蓄和再分配，从而实现其涵养水源的功能，在一定程度上反映了整个生态系统的涵养水源和储蓄水分的潜在能力[3,14,20]。

太行山区作为北方典型的土石山区，具有降水少且季节分配不均、土层浅薄、持水能力低的生态劣势，生态环境脆弱，但却是华北平原的生态屏障和重要水源保障[21-23]。水成为太行山区植被保护与恢复的重要限制因素之一，因此，比较分析太行山区主要森林植被的水源涵养能力，并提出切实可行的提高水源涵养的建议和措施对华北地区的水资源安全保障十分重要。目前对于太行山区域内的森林水源涵养的研究案例不少，但多局限于一个小的流域或者个别森林群落和林分类型，尚缺少对各种森林植被类型水源涵养能力的综合比较分析。为了综合分析太行山区主要森林植被类型的水源涵养能力，本文基于大量文献资料，筛选出太行山区天然落叶阔叶林、人工落叶阔叶林、混交林、天然针叶林、人工针叶林和灌丛植被等的样点研究数据，采用综合蓄水能力法系统比较该区主要森林植被的林冠截持降水、枯落物蓄水和土壤持水能力，进而分析主要植被的水源涵养功能的差异，为评估植被的水源涵养能力、合理经营森林资源和实现水资源科学管理提供依据，对太行山地区的生态环境保护和防灾减灾也具有重要意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

太行山位于 110°14′~114°33′E，34°34′~40°43′N，

其东侧为断层构造，相对高差达 1 500~2 000 m，最高峰海拔 2 882 m，自北向南覆盖河北、北京、山西和河南 4 个省市，绵延数 400 余 km，地处中国地形第二阶梯的东缘，也是黄土高原的东部界线。太行山属于暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，春季多风，雨热同季，但明显冬长夏短，年平均气温在 10 ℃左右，年降水量在 530 mm 左右，7 月降水最多，为 130 mm 左右，12 月最少，不足 10 mm。地带性土壤类型以褐土为主。太行山是中国东部的一条重要地理界线，东西两侧的植被垂直带特征存在明显差异，东侧植被属于暖温带落叶阔叶林地带类型，植物种类丰富，西侧植被则属于森林草原和干草原地带类型。

1.2 数据收集与分析

本文以 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 90 m × 90 m DEM 为基础，提取太行山区边界信息(图 1)，定位太行山区范围和确定该区的主要森林植被类型，收集研究区内 1990s 以来森林生态系统水源涵养定量研究所需的降水量、林型、郁闭度、林冠降水截流量、枯落物现存量和土壤非毛管孔隙度等指标数据，用以估算冠层、枯枝落叶层和土壤层的水分持留能力。参考中国植被分布图(1∶100 万)[24]建立太行山区典型植被类型的水源涵养指标数据库[6,25]，共获取太行山区森林立地(研究点)尺度的 196 条森林植被水源涵养有效数据记录，代表了主要的森林和灌丛植被类型。计算主要森林植被类型水源涵养指标的平均值及变幅(表 1，仅列出代表性植被类型数据)。从时间跨度来看，获取了 1990s 的 8 篇 24 条数据、2010s 的 15 篇 50 条记录和 2000s 的 122 条记录，其中，绝大部分数据都是 2003—2013 年的数据，占总数据的 86.5%。因此，本研究主要反映了 2000s—2010s 之间的植被水源涵养能力。

植被类型按照中国植被分类系统分类，考虑太行山区山地气候带及植物生活型的相似性，参考文献样本量，将研究区植被分为 4 种植被类型和 7 种林型。植被类型分别为：针叶林、针阔混交林、落

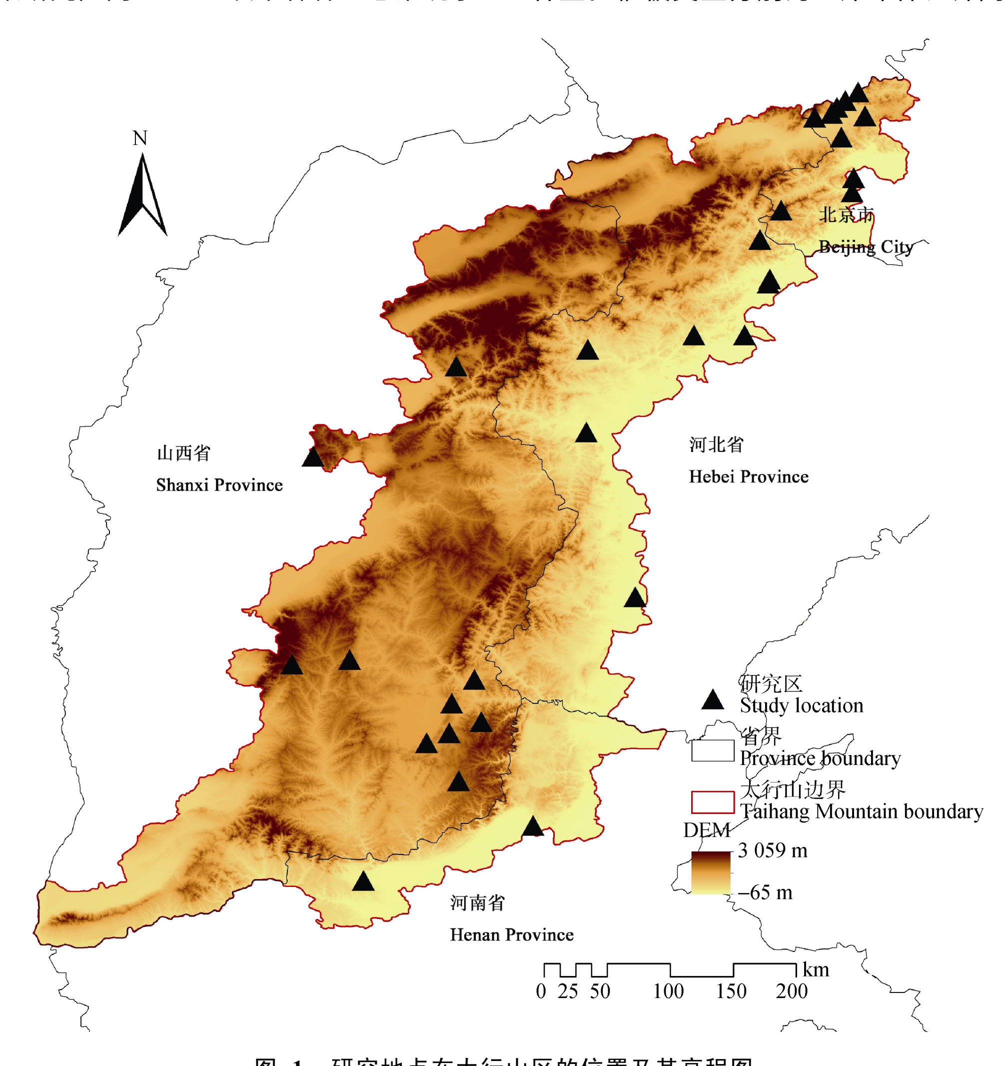


图 1 研究地点在太行山区的位置及其高程图

Fig. 1 Map of the study locations and DEM in Taihang Mountain

表 1　太行山区主要森林类型水源涵养特征参数

Table 1　Characteristic parameters of water conservation of main forest types in Taihang Mountain

森林类型 Forest type	地点 Location	郁闭度 Canopy density	枯落物现存量 Litters ($t\cdot hm^{-2}$)	非毛管孔隙度 Soil non-capillary porosity (%)	降水量 Precipitation (mm)	枯落物最大持水率 Maximum water-holding capacity of litter (%)	非毛管孔隙储水量 Soil non-capillary porosity (mm)	水源涵养功能 Water conservation ability (mm)	NDVI	参考文献 Reference
油松 *Pinus tabuliformis*	河北阜平 Fuping, Hebei	0.70	16.54	2.95	604	220.41	11.80	15.38	0.475	[26]
	河北邢台 Xingtai, Hebei	0.95	32.12	14.22	558	129.40	79.42	83.14	0.756	[21]
	山西平顺 Pingshun, Shanxi	0.60	12.38	8.83	600	220.41	16.34	28.60	0.485	[27]
	山西平顺 Pingshun, Shanxi	0.58	16.54	8.47	608	220.41	15.58	19.16	0.468	[28]
	北京门头沟 Mentougou, Beijing	0.70	18.50	14.22	529	194.60	79.42	83.90	0.551	[29]
侧柏 *Platycladus orientalis*	河北平山 Pingshan, Hebei	0.60	10.55	11.24	559	123.17	44.96	47.16	0.435	[22]
	山西方山 Fangshan, Shanxi	0.76	2.69	8.30	516	237.77	49.80	51.00	0.494	[30]
	河南辉县 Huixian, Henan	0.68	12.94	18.40	640	169.13	36.80	47.92	0.726	[31]
华北落叶松 *Larix gmelinii*	北京门头沟 Mentougou, Beijing	0.75	8.39	12.39	650	377.35	99.12	103.15	0.591	[32]
	河北围场 Weichang, Hebei	0.60	17.61	4.17	660	272.59	29.17	34.87	0.411	[33]
刺槐 *Robinia psendoacacia*	河北邢台 Xingtai, Hebei	0.85	7.14	16.30	573	253.81	60.90	63.89	0.676	[21]
	北京八达岭 Badaling, Beijing	0.70	15.16	12.18	454	290.48	24.36	29.93	0.535	[34]
毛白杨 *Populus fomentosa*	河北平山 Pingshan, Hebei	0.50	7.25	10.68	550	202.29	42.72	45.43	0.512	[22]
白桦 *Betula platyphylla*	山西五台 Wutai, Shanxi	0.65	27.98	9.07	600	223.48	36.28	43.68	0.483	[35]
辽东栎 *Quercus wutaishanica*	北京门头沟 Mentougou, Beijing	0.77	14.68	12.18	572	232.69	48.72	53.31	0.607	[36]
蒙古栎 *Quercus mogolica*	北京密云 Miyun, Beijing	0.64	14.78	16.02	639	258.51	64.70	71.87	0.489	[37]
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
灌丛 Shrub	山西五台 Wutai, Shanxi	0.77	17.24	7.02	600	203.07	21.06	25.58	0.301	[35]

叶阔叶林和灌丛；森林类型按照优势树种归为 6 类具有代表性的乔木群落和 1 类灌丛，乔木群落分别是椴树属(*Tilia*)、栎属(*Quercus*)、杨属(*Populus*)、刺槐属(*Robinia*)等落叶阔叶乔木，松属(*Pinus*)、侧柏属(*Platycladus*)、落叶松属(*Larix*)等针叶乔木。同时参考太行山区各省、市的第 2 次土壤普查数据及地方县土壤志中相关评定方法，确定土壤贮蓄能力评价的有效深度(以 0.4 m 为准)。现有文献资料在林冠降水截留方面有部分数据缺失，运用指标特征数据库，采用临近相同植被类型的数据与植被指数(NDVI)的关系插补[25]。

本研究利用收集到的数据比较主要森林和灌丛植被的平均水源涵养能力，采用研究区同一林型的平均值反映其水源涵养能力，数据的标准差反映区域的异质性。

1.3 林冠截留率

森林对降水的调节作用首先表现为林冠对降水的截留过程[31-32]。作为森林生态系统水文作用的重要一环，林冠截留降雨是个复杂的过程，是降雨在到达地面过程中发生的第 1 次水量分配，它不仅影响降水的重新分配，还可以产生滞留作用及影响营养元素的输入等，在森林生态系统水文循环中具有重要的意义[1,33-35]。前人研究表明，林冠截留率(I, %)受到降雨量(p, mm)、降雨强度(i, mm·h^{-1})、风速(v, m·s^{-1})与林冠郁闭度(n, %)等因素影响[1,25]:

$$I=f(p, i, v, n) \tag{1}$$

林冠郁闭度在不考虑植物单体球形、椭球形、圆锥形等形态差异外，与植被种类、生长态势等具有相关性，而乔木植物的生长态势可通过实测数据与遥感图片结合分析进行估算。同时，在忽略降水强度与风速的动态影响后，结合斑块的林地类型和 NDVI 值，公式 1 可简化为某种林地中 $I \propto \mathrm{NDVI}_{林地}$[25]。因此，本文通过收集 2011—2016 年 8—9 月(2 期·a^{-1})MODIS Level4 16 d 数据 h2705、h2605 与 h0604 区地表反射产品共 30 幅，经过投影转换、裁剪拼接等处理，通过文献资料内试验区、实地考察确定林地类型，并选取方圆 3 km 区域的 NDVI 作为郁闭度样本点，加权计算 8—9 月多年平均 NDVI，计算得到 $\mathrm{NDVI}_{林地}$用于估算不同林分的降水截留率。

1.4 森林水源涵养功能计量

森林水源涵养功能与气候因素具有强相关。由于受到年际温度、降水量波动性以及降水集中度等因素的影响，森林蓄水能力处于动态变化过程。但受限于试验设备、条件等因素的影响，短期林间降水试验定量计量方法存在不确定性，考虑到整个太行山区尺度的土壤质地差异性较小、降水协同性较高等特点，利用森林涵养水源能力作为计量林冠层降水截留量、枯落物层持水量和土壤层贮水量的综合水源涵养的指标计算不同森林类型综合水源涵养能力，为人工调节水源涵养提供林地种植参考(公式 2-5)[2,6]。

林冠层降水截留量是指一次降水过程中林冠的截留能力，可以通过林冠截留量与林外降水量计算(公式 3)；枯落物持水量通过凋落物现存量与最大持水率计算(公式 4)；土壤层贮水量通过土壤非毛管孔隙度和土壤厚度计算(公式 5)。这种方法综合考虑了森林 3 个作用层对降水的拦蓄作用，比较全面，有助于比较分析不同作用层拦蓄降水功能的大小，但需要大量的实测数据且计算复杂。

森林综合涵养水源能力:

$$\mathrm{TW}_i = \mathrm{CI}_i + \mathrm{LC}_i + S_i \tag{2}$$

式中：TW_i、CI_i、LC_i和 S_i分别表示第 i 种类型森林植被综合涵养水源能力、林冠层一次降水截流量、单位面积枯落物层持水量和单位面积土壤层贮水量，单位均为 mm。

林冠一次降水截留量:

$$\mathrm{CI}_i = A_i \times X_i^{B_i} \tag{3}$$

式中：X_i表示第 i 种森林植被林外一次降水量；A_i和 B_i 分别表示第 i 种类型森林林冠截流量与林外降水量幂函数方程中的常数，此处林冠一次降水截留量的数据直接从文献中提取，如果提取数据文献中没有直接的林冠一次降水截留量的数据而出现幂函数方程，则直接采用文献中数据及公式进行计算。

枯落物持水量:

$$\mathrm{LC}_i = L_i \times W_i \times 1\,000^{-1} \tag{4}$$

式中：L_i表示第 i 种类型森林的枯落物积累量(t·hm^{-2})，W_i 表示第 i 种类型森林枯落物最大持水率(%)。

土壤贮水量:

$$S_i = 10 P_i \times D_i \tag{5}$$

式中：P_i 表示第 i 种类型森林土壤的非毛管孔隙度(%)，D_i 表示第 i 种类型森林土壤深度，取值 0.4 m。

2 结果与分析

2.1 太行山区主要森林植被类型的林冠截留量

统计分析表明(图 2)，太行山区不同类型森林生长态势的加权 $\mathrm{NDVI}_{林地}$(郁闭度×NDVI)与前人调查点的定位点的截留率均具有相关性。Logistic 回归显示出太行山区主要森林植被在低生长态势时($\mathrm{NDVI}_{林地}$<

0.4)，落叶阔叶林降水截流率最高，针阔混交林次之，针叶林最低；当森林长势较好时(NDVI 林地>0.6)，针叶林降水截留率最高，针阔混交林次之，阔叶林最低。通过数据的回归计算，对森林水源涵养指标特征数据库中一次降水截流量缺失项进行计算补全。

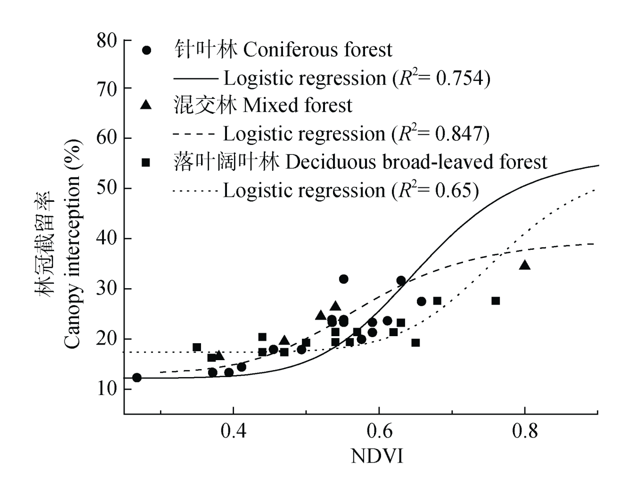


图 2　太行山区主要林分类型 NDVI 与林冠截留率的 Logistic 回归比较

Fig. 2　Logistic regression of NDVI and canopy interception of main forest stands of Taihang Mountain

太行山区各森林植被林冠层一次降水截留量平均为 2.02 mm，不同类型林分由于树种不同林冠层一次降水截留量不同(表 2)，其中以油松、侧柏和华北落叶松为代表的针叶林冠层一次降水截流量显著高于以刺槐、杨树、栎树为代表的落叶阔叶林冠层以及针阔混交林(P<0.05)，一次降水截留量达到 2.18 mm，而落叶阔叶林截流量为 1.93 mm，3 种乔木林中最小，但与针阔混交林差异不显著。太行山区主要森林类型林冠层一次降水截流量有所不同，侧柏>油松>栎、椴>刺槐>桦、杨>落叶松>灌丛，其中最大的侧柏林冠层一次降水截流量为 2.53 mm，落叶松林冠一次降水截流量仅为 1.20 mm，但仍高于灌丛。

2.2　太行山区主要类型森林植被的枯落物持水量

森林植被枯落物层是涵养水源的又一主要作用层，具有明显的截持降水、调节地表径流等功能，其蓄积量对评价森林水文功能占有非常重要的地位，而森林枯落物层蓄积量受到气候、森林类型、林龄、土壤动物、枯落物分解速度等众多因素的影响[53-55]。

太行山区各林分地表枯落物层现存量平均为 14.75 t·hm^{-2}，研究区域内枯落物现存量变动范围为 9.97~19.47 t·hm^{-2}(表 3)，最大为针阔混交林，最小为灌丛。各林分枯落物层最大持水率平均为 232.54%，研究区域内枯落物最大持水率的变动范围为 210.37%~260.01%，从大到小依次为灌丛、落叶阔叶林、针阔混交林和针叶林。各林分枯落物层最大持

表 2　太行山区主要森林植被冠层生态水文功能

Table 2　Ecological and hydrological functions of canopy of main forest stands in Taihang Mountain

林分 Forest stand	样本量 Sample size	降水量 Precipitation (mm)	郁闭度 Canopy density	林冠一次降水截留量 Canopy interception (mm)	主要代表森林类型 Main representative forest types of forest stand
针叶林 Coniferous forest	79	579.71	0.68	2.18±0.19b	油松林、侧柏林、华北落叶松林[21,36-41] *Pinus tabuliformis* forest, *Platycladus orientalis* forest, *Larix gmelinii* forest[21,36-41]
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	59	567.64	0.71	1.93±0.11a	刺槐林、山杨、桦树、栎树、椴树等[30,36,41-45] *Robinia psendoacacia* forest, *Populus davidiana* forest, *Betula* spp. forest, *Quercus* spp. forest, *Tilia* spp. forest[30,36,41-45]
混交林 Mixed forest	19	538.40	0.60	1.96±0.11a	油松-辽东栎混交林、刺槐-侧柏混交林、落叶松-桦木混交林等[45-48] *Pinus tabuliformis* and *Quercus wutaishanica* mixed forest, *Robinia psendoacacia* and *Platycladus orientalis* mixed forest, *Larix* spp. and *Betula* spp. mixed forest[45-48]
灌丛 Shrub	39	629.79	—	1.02±0.07a	荆条、野皂荚、虎榛子等[43,49-52] *Vitex negundo*, *Gleditsia microphylla*, *Ostryopsis davidiana*[43,49-52]

表 3　太行山区主要森林植被枯落物蓄积量和持水能力

Table 3　Litter accumulation and water holding capacity of main forest stands in Taihang Mountain

林分 Forest stand	样本量 Sample size	枯落物现存量 Litter reserve (t·hm^{-2})	枯落物最大持水率 Maximum water holding capacity of litter (%)	枯落物最大持水量 Maximum water holding capacity of litter (mm)
针叶林 Coniferous forest	79	15.25±0.93	210.37±6.86	3.45±0.32
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	59	14.30±0.76	245.49±7.97	4.14±0.24
混交林 Mixed forest	19	19.47±3.27	228.16±11.08	4.27±0.43
灌丛 Shrub	39	9.97±0.95	260.01±6.70	1.80±0.20

水量平均为 3.41 mm，研究区域内枯落物最大持水量的变动范围为 1.80~4.27 mm，最大为针阔混交林，最小为灌丛。

太行山区主要森林植被类型枯落物层贮水量存在差异(图 3)，整体来看栎、椴、桦、杨阔叶林>油松、落叶松、侧柏针叶林>灌丛，其中枯落物层贮水量最大是栎、椴林 4.92 mm，最小是灌丛，仅为 1.80 mm。

2.3　太行山区主要类型森林植被的土壤贮水量

森林土壤层作为水分贮蓄的主要场所，被称为大气降水"储存库"和"调节器"，体现在其对水分有渗透性和储存性，在整个生态系统中具有重要的不可替代的涵养水源能力[55]。土壤层的蓄水能力与土壤质地、土壤厚度及土壤孔隙度关系非常密切，降水渗入土壤后，水分主要存在于土壤最主要的组成非毛管孔隙中。在森林生长过程中，植被根系不断新老更替，林下枯落物不断堆积分解，改善了土壤结构，增大了非毛管孔隙度，即可以增强土壤的入渗性能和贮水功能，起到了很好的蓄水作用[56]。

太行山区各林分土壤非毛管孔隙度差异不大(表 4)，变化范围为 10.45%~15.62%，最大的是落叶阔叶林，最小是针阔混交林。土壤厚度均值为 40 cm，各林分该厚度的土壤非毛管孔隙最大持水量均值为 52.22 mm，变化范围为 43.06~60.27 mm，其中落叶阔叶林最大，灌丛最小。

表 4　太行山区主要森林植被土壤非毛管孔隙度和持水量

Table 4　Soil non-capillary porosity and water retention of main forest stands in Taihang Mountain

林分 Forest stand	样本量 Sample size	非毛管孔隙度 Soil non-capillary porosity (%)	0~40 cm 土壤持水量 0–40 cm soil retention (mm)
针叶林 Coniferous forest	79	14.99±1.02	59.64±3.40
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	59	15.62±1.00	60.27±3.52
混交林 Mixed forest	19	10.45±1.05	45.89±4.81
灌丛 Shrub	39	14.70±1.58	43.06±5.22

太行山区主要森林植被类型土壤层持水量也存在差异(图 3)，整体来看栎、椴、桦、杨阔叶林>侧柏、油松、落叶松针叶林>灌丛，其中土壤层持水量最大是栎、椴林 71.32 mm，最小是灌丛仅为 38.82 mm。

2.4　太行山区主要类型森林植被的综合蓄水能力

各类型森林植被总的持水量由林冠层、枯落物层和土壤层 3 个部分对降雨截流和储存量组成，植被总的持水量越大，表明其涵养水分的能力越强。太行山地区各种森林植被平均综合涵养水源能力为 64.66 mm。综合蓄水能力针叶林(侧柏、油松)>落叶阔叶林(栎、椴、刺槐、桦、杨)>针阔混交林>灌丛，其中综合蓄水能力最强的是栎、椴阔叶林，为 78.77 mm；灌丛综合蓄水能力最弱，仅为 41.52 mm(图 3)。

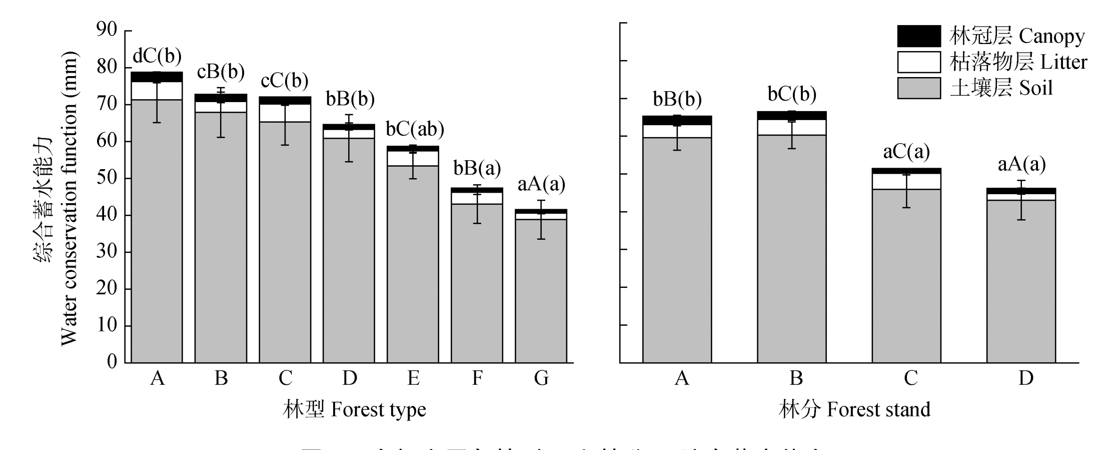


图 3　太行山区各林型(a)和林分(b)综合蓄水能力

Fig. 3　Water conservation function of different forest types (a) and forest stand (b) in Taihang Mountain

图 a 中，A、B、C、D、E、F 和 G 分别为侧柏林、油松林、栎椴林、刺槐林、桦杨林、落叶松林和灌丛。图 b 中，A、B、C 和 D 分别为落叶阔叶林、针叶林、针阔混交林和灌丛。不同林型和林分间林冠层蓄水能力差异用小写英文字母表示，枯落物层蓄水能力差异用大写英文字母表示，土壤层蓄水能力差异用(小写英文字母)表示，不同字母表示 $P < 0.05$。In figure a, A, B, C, D, E, F, and G are *Platycladus* forest, *Pinus* froest, *Quercus* and *Tilia* forest, *Robinia* forest, *Betula* and *Populus* forest, *Larix* forest and shrub, respectively. In figure b, A, B, C and D are deciduous broad-leaved forest, coniferous forest, mixed forest and shrub. Canopy interception difference among each forest type and forest stand is expressed in lowercase letters. Litter containment difference among each forest type and forest stand is expressed in capital letters. Soil retention difference among each forest type and forest stand is expressed in (lowercase letters). Different letters indicate significant differences among forest types or forest stands at $P < 0.05$.

太行山区各森林植被林冠层一次降水截留量平均依次为：天然林(2.02 mm)>人工林(1.99 mm)，差异不显著；天然纯林(2.10 mm)>人工林(1.99 mm)，差异不显著；天然纯林(2.10 mm)>天然混交林(1.86 mm) (P<0.05)。

各森林植被枯落物层最大持水量平均依次为：天然林(3.69 mm)>人工林(3.54 mm)，差异不显著；天然混交林(4.38 mm)>天然纯林(3.56 mm) (P<0.05)，天然混交林(4.38 mm)>人工林(3.54 mm) (P<0.05)。

各森林植被土壤层非毛管孔隙最大持水量平均依次为：天然林(61.32 mm)>人工林(57.88 mm)，差异不显著；天然纯林(64.60 mm)>人工林(57.88 mm) (P<0.05)，天然纯林(64.60 mm)>天然混交林(51.56 mm) (P<0.05)。

各森林植被综合蓄水能力平均依次为：天然林(66.68 mm)>人工林(58.63 mm)，差异不显著；天然纯林(69.95 mm)>人工林(58.63 mm) (P<0.05)，天然纯林>天然混交林(56.97 mm) (P<0.05)，人工林与天然混交林差异不显著。不同森林植被类型 3 个层次对降水的截持量及其综合蓄水能力见表 5。

表 5　太行山区森林植被不同类型综合蓄水能力比较

Table 5　Comparison of water conservation function of different forest vegetation types in Taihang Mountain

属名 Genus	森林类型 Forest type	林冠一次降水截留量 Canopy interception (mm)	枯落物最大持水量 Maximum water holding capacity of litter (mm)	0~40 cm 土壤持水量 0–40 cm soil retention (mm)	综合蓄水能力 Water conservation function (mm)
油松 *Pinus*	天然林 Natural forest	2.31	3.44	58.83	64.58
	人工林 Plantation	2.30	5.50	67.69	75.49
	纯林 Pure forest	2.42	3.23	67.00	72.64
	混交林 Mixed forest	1.92	4.05	35.22	41.19
侧柏 *Platycladus*	天然林 Natural forest	2.01	2.35	75.89	80.24
	人工林 Plantation	2.62	2.53	60.89	66.04
	纯林 Pure forest	2.07	2.30	75.38	79.75
	混交林 Mixed forest	1.75	2.70	79.42	83.87
落叶松 *Larix*	天然林 Natural forest	1.95	3.38	50.40	55.73
	人工林 Plantation	1.60	2.99	29.35	33.94
	纯林 Pure forest	2.24	3.69	54.62	60.54
	混交林 Mixed forest	2.20	3.17	40.17	45.53
刺槐 *Robinia*	天然林 Natural forest	1.91	2.70	61.59	66.19
	人工林 Plantation	1.94	3.89	58.56	64.40
	纯林 Pure forest	1.94	2.72	64.30	68.96
	混交林 Mixed forest	1.73	2.53	41.19	45.45
桦、杨 *Betula, Populus*	天然林 Natural forest	1.83	5.15	52.11	59.10
	人工林 Plantation	1.82	2.40	64.33	68.55
	纯林 Pure forest	1.81	4.73	52.55	59.09
	混交林 Mixed forest	1.88	6.17	51.06	59.11
栎、椴 *Quercus, Tilia*	天然林 Natural forest	2.14	4.97	66.51	73.62
	人工林 Plantation	2.35	4.39	53.33	60.07
	纯林 Pure forest	2.10	4.93	64.19	71.22
	混交林 Mixed forest	2.13	5.02	69.35	76.50

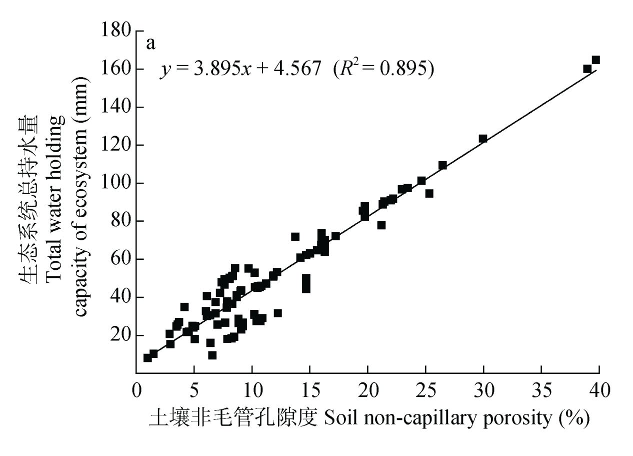
3　讨论与结论

森林植被的水源涵养功能是指森林生态系统通过地上林冠层、地表枯落物层及土壤层 3 个层次拦截、贮蓄林外降水，改变降水的分配过程，缓和地表径流，补充地下水及径流，进而起到有效的调水蓄水作用[2,57]。本研究通过建立太行山地区降水截留率与林地生长态势间的定量关系(图 2)，采用较为全面和注重生态过程的综合蓄水能力法，计量森林生态系统各层次水源涵养量，更加符合真实情况。作为森林生态系统一项重要的服务功能，水源涵养的研究对森林管理、植被建设、土地利用、环境保护和水土资源优化等均具有一定的指导意义。本研究在分析大量太行山区相关文献的基础上，发现：

1)土壤非毛管孔隙度与生态系统综合持水量呈正相关关系(图 4a), 且最大持水量占整个森林生态系统综合持水量的 90%以上(图 3), 表明土壤层作为森林生态系统水文效应最重要的一层, 是整个森林系统水分循环的主要贮蓄库和调节器。刘璐璐等[20,58]的研究结果也表明, 土壤层对琼江流域和南北盘江流域森林生态系统水源涵养的贡献达到 7 成以上。因此, 水源涵养区在利用和保护的过程中, 需重点关注对土壤质量的改良。考虑到土壤的变化, 尤其是土壤修复是一个缓慢的过程, 土地利用方式变化和植被建设方案的规划应该首先考虑对土壤层的影响, 在日常的森林管理中也应避免超过土壤的阈值。

2)该地区针叶林降水截留率显著高于阔叶林与针阔混交林, 各森林植被中针叶林林冠层一次降水截流量最大, 混交林次之, 落叶阔叶林最小(表 2), 而在针叶林中油松林、侧柏林降水截留率显著高于其他林型。究其原因, 在于区域降水集中在 7—9 月, 山地降水强度大且多伴随大风, 更利于针叶林丛状硬叶汇集水分, 而从叶片形态上, 油松、侧柏叶片长度、叶片密度等形态上更适合降水集中、强度大的气候环境; 油松、侧柏林冠层降水再分配能力优势使得林下水分更集中于根部区域, 有利于森林整体水源涵养[59]。而且, 油松和侧柏抗旱能力强, 能够适应恶劣的生态环境。因此, 在太行山区土地贫瘠区域, 油松和侧柏可以作为主要的植被建设树种种植。

3)纯林林冠一次降水截流量高于人工林和混交林。在不同林型中侧柏、油松林、栎椴林的林冠一次截留量要高于其他类型森林, 这与侧柏、油松、栎椴林枝叶密集、冠幅大密不可分。而纯林枯落物最大持水量低于混交林, 由于混交林低郁闭度下更有利于林下低矮灌草丛生长, 因此枯落物现存量更高, 使得枯落物层持水量最大(图 4b), 这表明降水过程中, 混交林林冠层降水再分配能力较弱, 林下枯落物层更易涵养水源。韩同吉等[60]在北方石质山区的研究也发现枯落物层有效拦蓄量表现为针阔混交林>阔叶林>针叶林。



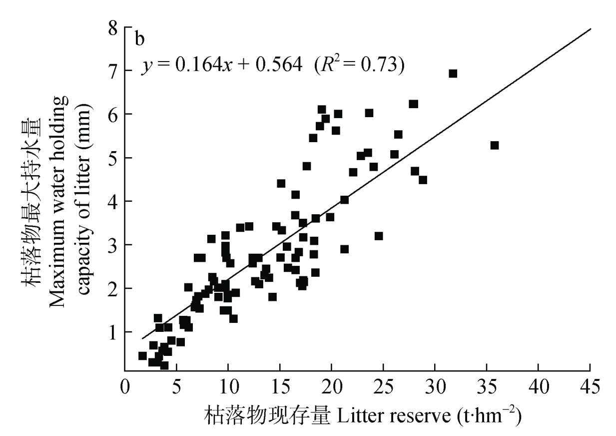


图 4 太行山区生态系统总持水量与土壤非毛管孔隙度(a)及植被枯落物持水量与枯落物现存量(b)的关系

Fig. 4 Relationships between total water holding capacity of ecosystem and soil non-capillary porosity (a), and maximum water holding capacity of litter and litter reserve (b) in Taihang Mountain

4)天然林林冠与人工林林冠降水再分配能力差异不显著, 但枯落物层最大持水量略高于人工林, 土壤层最大持水量也高于人工林。因此, 天然林综合蓄水能力整体高于人工林。不同林型间, 刺槐天然林综合蓄水能力最优, 其次是侧柏天然林、油松天然林、侧柏人工林、油松人工林、栎椴天然林。太行山地区森林植被在整个华北地区起到重要的生态调节作用, 但长期受到人为开发利用, 其植被生物生产功能和水源涵养功能较低, 林冠层、枯落物层的持水量相对较低[22]。为提高该区域整体水源涵养能力, 需要在保护天然林的基础上提高人工林种植面积, 采用人工种植综合水源涵养能力较高的油松、侧柏来替代落叶松和灌丛。但在实际人工种植过程中, 仍要考虑到生物多样性对生态系统弹性和稳定性的重要作用, 切不可大面积的只保留单一树种。另外, 最新研究发现黄土高原的植被重建已接近该地区水资源植被承载力的阈值[61], 因此在太行山区的植被恢复过程中, 应当考虑实际水资源量, 在保障生态安全的前提下, 优化配置水土资源, 尽量使太行山区能够对华北平原和京津冀地区的水量缺口有所贡献。

从长远看来, 在人工种植水源涵养功能较强树种的同时, 需减轻人类活动对太行山地区森林植被的影响强度并实施天然林局部长期封育, 随着封育年限的增加, 树龄增加, 林冠结构、枯落物量也会随之增加, 通过枯落物分解形成的土壤腐殖质也会对土壤结构有所改善, 从而提高森林植被对林外降水

的截持贮蓄作用, 将有利于整体提高森林生态系统的水源涵养功能。

本研究在收集大量文献的基础上, 对太行山区主要森林植被的水源涵养进行了分析和比较, 对该区域合理经营森林资源和进行植被建设具有一定的借鉴意义。但研究过程中未考虑林下植被截留、土壤类型、树龄、海拔以及坡度的差异, 因此研究结果不够细致, 与实际情况可能有所偏差, 未来的工作中希望能够借助土壤数据库和地理信息系统技术, 结合实地调研, 更加系统而直观地评价太行山区森林系统的水源涵养能力及其对华北平原的重要贡献。另外, 植被是不断变化的, 在以后的研究中还应考虑时间尺度上的动态变化, 探讨不同时期森林水源涵养能力的主要限制因子, 进行更加深化的研究。

参考文献 References

[1] 刘世荣, 温远光, 王兵. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996
Liu S R, Wen Y G, Wang B. Hydrological Function Rule of Chinese Forest Ecosystem[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996

[2] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529–534
Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529–534

[3] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5191–5196
Lü Y H, Hu J, Sun F X, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5191–5196

[4] Villa F, Voigt B, Erickson J D. New perspectives in ecosystem services science as instruments to understand environmental securities[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series B, Biological Sciences, 2014, 369(1639): 20120286

[5] 范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 论森林在水源涵养中的作用[J]. 辽宁林业科技, 2001, (5): 22–25
Fan S X, Jiang D M, Aalamusa, et al. On water-regulation function of forest[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2001, (5): 22–25

[6] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 351–360
Shi P L, Wu B, Cheng G W, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the Upper Yangtze Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(3): 351–360

[7] 胡健, 吕一河, 张琨, 等. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3338–3349
Hu J, Lü Y H, Zhang K, et al. The differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou Catchment, Qilian Mountain, Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3338–3349

[8] 朱万才. 大兴安岭部分典型林分类型森林水源涵养的研究[J]. 北京农业, 2015, (20): 105–106
Zhu W C. Water conservation of typical forest types in Daxing'anling[J]. Beijing Agriculture, 2015, (20): 105–106

[9] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012, 9(3): 4161–4191

[10] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 585–593
Li S M, Xie G D, Zhang C X, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(4): 585–593

[11] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 261–272
Fu B J, Lü Y H, Gao G Y. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5): 261–272

[12] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223–226
Lu S W, Mao F L, Jin F, et al. The water resource conservation of forest ecosystem in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4): 223–226

[13] 邵英男, 沃晓棠, 李云红, 等. 森林水源涵养功能研究进展[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2013, 26(3): 3–4
Shao Y N, Wo X T, Li Y H, et al. Research progress of forest water conservation function[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2013, 26(3): 3–4

[14] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 68–73
Deng K M, Shi P L, Xie G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits[J]. Resources Science, 2002, 24(6): 68–73

[15] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993
Ma X H. Forest Hydrology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993

[16] Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1416–1426

[17] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443–452
Zhao T Q, Ouyang Z Y, Wang X K, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4): 443–452

[18] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101: 122–128

[19] Bangash R F, Passuello A, Sanchez-Canales M, et al. Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control[J].

Science of the Total Environment, 2013, 458–460: 246–255

[20] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 451–457
Liu L L, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Estimation of forest water conservation capacity in Qiongjiang River watershed[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(3): 451–457

[21] 徐学华, 张慧, 王海东, 等. 太行山前南峪旅游区 3 种典型林分枯落物持水特性的研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 108–112
Xu X H, Zhang H, Wang H D, et al. Study on water holding capacity of forest litters of three typical types in Qiannanyu tourism zone of Taihang Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 108–112

[22] 陈倩, 周志立, 史琛媛, 等. 河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 206–211
Chen Q, Zhou Z L, Shi C Y, et al. Litter and soil water-holding capacity of different typical forests in hilly region of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 206–211

[23] 钱金平, 王仁德, 张广英. 太行山区人工油松林对坡面入渗产流的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 40–43
Qian J P, Wang R D, Zhang G Y. Influence of artificial pine forest on the slope run-off and infiltration characteristic in Taihang Mountainous Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 40–43

[24] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1∶1000000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001
Editorial Board of Vegetation Map of Chinese Academy of Sciences. 1∶1000000 Vegetation Atlas of China[M]. Beijing: Science Press, 2001

[25] 高雁, 宋丹丹, 范世香, 等. 林冠截留容量及其确定方法[J]. 农业开发与装备, 2014, (6): 140–141
Gao Y, Song D D, Fan S X, et al. Canopy interception capacity and its determination method[J]. Agricultural Development & Equipment, 2014, (6): 140–141

[26] 张金香, 孙吉定, 郝铁山, 等. 太行山片麻岩区主要植被类型土壤水保性能指标观测[J]. 河北林业科技, 1995, (1): 17–20
Zhang J X, Sun J D, Hao T S, et al. Soil and water conservation performance of main vegetation types in gneiss area of Taihang Mountain[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 1995, (1): 17–20

[27] 史敏华, 王棣, 李任敏. 太行山石灰岩山地封山区植被水土保持功能的研究[J]. 北京林业大学学报, 1996, 18(S3): 93–97
Shi M H, Wang D, Li R M. Study on soil and water conservation function of vegetation in closed area of limestone mountainous area in Taihang Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1996, 18(S3): 93–97

[28] 王维. 太行山石灰岩中山区雨水资源高效利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
Wang W. Study on high-effective utilization of rainwater resource in calcareous rock area in middle Taihang Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009

[29] 贾志清, 郭保贵, 李昌哲. 太行山石质山地植被结构优化评价[J]. 林业科学研究, 2004, 17(2): 226–230
Jia Z Q, Guo B G, Li C Z. Vegetation optimization structure evaluation in rocky land of Taihangshan Mountain[J]. Forest Research, 2004, 17(2): 226–230

[30] 罗梅, 王威, 宗雪, 等. 水源涵养林结构与功能耦合关系模型研究——以北京山区水源涵养林为例[J]. 林业资源管理, 2011, (5): 84–88
Luo M, Wang W, Zong X, et al. Study on the coupling relationship between structure and function of water conservation forests in mountainous area of Beijing[J]. Forest Resources Management, 2011, (5): 84–88

[31] 周爽, 崔玉柱, 何晓红. 影响林冠截留量的主要因素分析[J]. 林业勘查设计, 2004, (3): 37
Zhou S, Cui Y Z, He X H. Analysis of main factors affecting forest canopy interception[J]. Forestry Prospecting and Design, 2004, (3): 37

[32] 余新晓, 史宇, 王贺年, 等. 森林生态系统水文过程与功能[M]. 北京: 科学出版社, 2013
Yu X X, Shi Y, Wang H N, et al. Hydrological Process and Function of Forest Ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 2013

[33] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55–59
Wang A J, Zhang W B. Reviews of vagetation interception of rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4): 55–59

[34] 牛强, 崔卓卿. 林冠截留研究现状及其影响因素[J]. 南方农业, 2015, 9(21): 129
Niu Q, Cui Z Q. Research status and influencing factors of forest canopy interception[J]. South China Agriculture, 2015, 9(21): 129

[35] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 16–22
Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(1): 16–22

[36] 宁金魁. 水源涵养林结构调整研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004
Ning J K. The study on the regulation of water resource protection forest (W.R.P.F.)[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004

[37] 周彬. 太岳山油松林人工林水文特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013
Zhou B. Research on ecohydrological characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations in Taiyue Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013

[38] 王骄洋. 冀北山区华北落叶松人工林林分主要因子与其水源涵养功能关系研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013
Wang J Y. Study on the relationship between the main factors and its function of water conservation in *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation forest in noerthern Hebei mountain[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2013

[39] 贾志清, 刘创民, 张理宏, 等. 太行山石质砂岩区森林植被涵养水源效能研究[J]. 北京林业大学学报, 1996, 18(S3): 87–92
Jia Z Q, Liu C M, Zhang L H, et al. Study on water conservation efficiency of forest vegetation in the stone sandstone area of Taihang Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1996, 18(S3): 87–92

[40] 弓运泽. 河北省太行山石灰岩区植被恢复关键技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006
Gong Y Z. The technology study of vegetation recovery in the limestone region in Taihang Mountain in Hebei[D]. Baoding: Hebei Agricultural University Province, 2006
[41] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5009–5016
Mo F, Li X Y, He S X, et al. Evaluation of soil and water conservation capacity of different forest types in Dongling Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 5009–5016
[42] 李校. 八达岭林场水源保护林生态功能评价研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007
Li X. Study on ecological function evaluation of water resource protection of forests in Badaling forest center[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2007
[43] 马平安, 郭全邦, 李荣华, 等. 太行山片麻岩山地植被水土保持效益研究[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(3): 43–46
Ma P A, Guo Q B, Li R H, et al. Benefits of soil and water conservation of gneiss mountain vegetation in Taihang Mountain[J]. Geography and Territorial Research, 1999, 15(3): 43–46
[44] 岳永杰. 北京山区防护林优势树种群落结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008
Yue Y J. Study on community structure of dominant species of protection forest in Beijing mountainous area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008
[45] 周择福, 林富荣, 宋吉红. 不同经营模式的水源涵养林生态防护功能研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 189–195
Zhou Z F, Lin F R, Song J H. Study on ecological protective functions of water conservation forest managed with different measurements[J]. Forest Research, 2003, 16(2): 189–195
[46] 张伟. 冀北山地森林水文特征研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011
Zhang W. Study on hydrological characteristics of forest in north mountain of Hebei Province[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2011
[47] 王棣, 吕皎. 油松混交林的水土保持及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 44–46
Wang D, Lü J. Function of water and soil conservation of mixed forest of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(4): 44–46
[48] 徐学华, 于树峰, 崔立志, 等. 冀北山地华北落叶松人工林水源涵养功能分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 162–166
Xu X H, Yu S F, Cui L Z, et al. Analysis on water conservation function of *Larix principis-rupprechtii* man-made forest in north mountain of Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 162–166
[49] 杨海青. 南太行山低山丘陵区主要灌木林生态服务功能及可持续经营研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013
Yang H Q. The ecological services and sustainable management of the main shrubs in the hill areas of south Taihang Mountains[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013
[50] 刘恩. 人工水源涵养林水文效应与优化造林研究——以密云北庄乡水源保护区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
Liu E. Study on forest hydrological effects and optimal afforest models of artificial water conservation forest — A case study from Beizhuang water resource protection zone[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009
[51] 李红云. 石灰岩山区主要灌木树种水土保持功能的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005
Li H Y. Study on soil and water conservation capacity of the major bushes in limestone mountainous area[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2005
[52] 刘启慎. 豫北太行山石灰岩区不同植被类型水保功能综述[J]. 河南林业科技, 1995, (4): 9–12
Liu Q S. Review on water conservation function of different north limestone area vegetation types in Taihang Mountain[J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 1995, (4): 9–12
[53] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 30–34
Zhu J Z, Liu J J, Zhu Q K, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5): 30–34
[54] Rueda-Delgado G, Wantzen K M, Tolosa M B. Leaf-litter decomposition in an Amazonian floodplain stream: Effects of seasonal hydrological changes[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(1): 233–249
[55] 张卫强, 李召青, 周平, 等. 东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 130–134
Zhang W Q, Li Z Q, Zhou P, et al. Water-holding characteristics of typical forests types litter in the upper and middle reaches of Dongjiang watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 130–134
[56] 白顺江. 雾灵山森林生物多样性及生态服务功能价值仿真研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006
Bai S J. Study on forests biodiversity and ecosystem service value simulation in Wuling Mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006
[57] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 北京市森林生态系统的水源涵养功能[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5619–5624
Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5619–5624
[58] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603–611
Liu L L, Cao W, Shao Q Q. Water conservation function of forest ecosystem in the southern and northern Pan River watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 603–611
[59] Will R, Fox T, Akers M, et al. A range-wide experiment to investigate nutrient and soil moisture interactions in loblolly pine plantations[J]. Forests, 2015, 6(6): 2014–2028
[60] 韩同吉, 裴胜民, 张光灿, 等. 北方石质山区典型林分枯落物层涵蓄水分特征[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2005, 36(2): 275–278
Han T J, Pei S M, Zhang G C, et al. Water-holding characteristics of litter layer in different forest stands on rocky mountain region[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2005, 36(2): 275–278
[61] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019–1022